

Une méthodologie de modélisation numérique de terrain pour la simulation hydrodynamique bidimensionnelle

A methodology to construct a numerical terrain model for two-dimensional hydrodynamic simulations

Y. Secretan, M. Leclerc, S. Duchesne et M. Heniche

Volume 14, numéro 2, 2001

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705417ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/705417ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Secretan, Y., Leclerc, M., Duchesne, S. & Heniche, M. (2001). Une méthodologie de modélisation numérique de terrain pour la simulation hydrodynamique bidimensionnelle. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 14(2), 187–212. <https://doi.org/10.7202/705417ar>

Résumé de l'article

L'article pose la problématique de la construction du Modèle Numérique de Terrain (MNT) dans le contexte d'études hydrauliques à deux dimensions, ici reliées aux inondations. La difficulté est liée à l'hétérogénéité des ensembles de données qui diffèrent en précision, en couverture spatiale, en répartition et en densité, ainsi qu'en géoréférentiation, notamment. Dans le cadre d'un exercice de modélisation hydrodynamique, toute la région à l'étude doit être documentée et l'information portée sur un support homogène. L'article propose une stratégie efficace supportée par un outil informatique, le MODELEUR, qui permet de fusionner rapidement les divers ensembles disponibles pour chaque variable qu'elle soit scalaire comme la topographie ou vectorielle comme le vent, d'en préserver l'intégrité et d'y donner accès efficacement à toutes les étapes du processus d'analyse et de modélisation. Ainsi, quelle que soit l'utilisation environnementale du modèle numérique de terrain (planification d'aménagement, conservation d'habitats, inondations, sédimentologie), la méthode permet de travailler avec la projection des données sur un support homogène de type maillage d'éléments finis et de conserver intégralement l'original comme référence. Cette méthode est basée sur une partition du domaine d'analyse par type d'information : topographie, substrat, rugosité de surface, etc.. Une partition est composée de sous-domaines et chacun associe un jeu de données à une portion du domaine d'analyse par un procédé déclaratoire. Ce modèle conceptuel forme à notre sens le MNT proprement dit. Le processus de transfert des données des partitions à un maillage d'analyse est considéré comme un résultat du MNT et non le MNT lui-même. Il est réalisé à l'aide d'une technique d'interpolation comme la méthode des éléments finis. Suite aux crues du Saguenay en 1996, la méthode a pu être testée et validée pour en démontrer l'efficacité. Cet exemple nous sert d'illustration.

Une méthodologie de modélisation numérique de terrain pour la simulation hydrodynamique bidimensionnelle

A methodology to construct a numerical terrain model for two-dimensional hydrodynamic simulations

Y. SECRETAN^{1*}, M. LECLERC¹, S. DUCHESNE¹, M. HENICHE¹

Reçu le 25 janvier 1999, accepté le 17 avril 2001**.

SUMMARY

The accurate characteristics description of both river main channel and flood plain is essential to any hydrodynamic simulation, especially if extreme discharges are considered and if the two-dimensional approach is used.

The ground altitude and the different flow resistance factors are basic information that the modeler should pass on to the simulator. For too long, this task remained "the poor relative" of the modeling process because it does not *a priori* seem to raise any particular difficulty. In practice however, it represents a very significant workload for the mobilisation of the models, besides hiding many pitfalls susceptible to compromise the quality of the hydraulic results.

As well as the velocity and water level fields are results of the hydrodynamic model, the variables describing the terrain and transferred on the simulation mesh constitute the results of the Numerical Terrain Model (NTM). Because this is strictly speaking a modeling exercise, a validation of the results that assess the quality of the model is necessary.

In this paper, we propose a methodology to integrate the heterogeneous data sets for the construction of the NTM with the aim of simulating 2D hydrodynamics of natural streams with the finite element method. This methodology is completely supported by a software, *Modeleur*, developed at INRS-Eau (SECRETAN and LECLERC, 1998; SECRETAN *et al.*, 2000). This tool, which can be assimilated to a Geographical Information System (GIS) dedicated to the applications of 2D flow simulations, allows to carry out all the steps of integrating the raw data sets for the conception of a complete NTM. Furthermore, it facilitates the application and the piloting of hydrodynamic simulations with the simulator *Hydrosim* (HENICHE *et al.*, 1999).

1. Institut national de la recherche scientifique - Eau, 2800 rue Einstein, suite 105, case postale 7500, Sainte-Foy, Québec, Canada, G1V4C7.

* Correspondance. E-mail : Yves_Secretan@inrs-eau.quebec.ca

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 29 mars 2002.

Scenarios for flow analysis require frequent and important changes in the mesh carrying the data. A return to the basis data sets is then required, which obliges to preserve them in their entirety, to have easily access to them and to transfer them efficiently on the mesh. That is why the NTM should rather put emphasis on basic data rather than on their transformed and inevitably degraded aspect after their transfer to a mesh.

The data integrity should be preserved as far as possible in the sense that it is imperative to keep distinct and to give access separately to different data sets. Two measuring campaigns will not be mixed; for example, the topography resulting from digitised maps will be maintained separated from that resulting from echo-sounding campaigns. This approach allows at any time to return to the measures, to control them, to validate them, to correct them and possibly, to substitute a data set a by another one.

The homogeneity of the data support with respect to the location of the data points is essential to allow the algebraic interaction between the different information layers. The operational objective which bear up ultimately the creation of the NTM in the present context is to be able to transfer efficiently the spatial basic data (measurements, geometry of civil works, etc.) each carried by diverse discretisations towards a single carrying structure.

With these objectives of integrity, accessibility, efficiency and homogeneity, the proposed method consists of the following steps:

1. Import of the data sets into the database, which possibly implies to digitise maps and/or to reformat the raw files to a compatible file format.
2. Construction and assembly of the NTM properly which consists, for each variable (topography, roughness, etc.), to create a partition of the domain under study, that is to subdivide it into juxtaposed sub-domains and to associate to each sub-domain the data set which describes the variable on it. More exactly, this declaratory procedure uses irregular polygons allowing to specify in the corresponding sub-domains the data source to be used in the construction of the NTM. As it is also possible to transform regions of the domain with algebraic functions to represent for example civil works in river (dikes, levees, etc.), the NTM integrates all the validated data sets and the instructions to transform them locally. From this stage, the NTM exists as entity-model and it has a conceptual character.
3. Construction of a finite element mesh.
4. Transfer by interpolation and assembly of the data of the different components of the NTM on the finite element mesh according to the instructions contained in the various partitions. The result is an instance of the NTM and its quality depends on the density of the mesh and the variability of the data. So, it requires a validation with respect to the original data.
5. Realisation of the analysis tasks and/or hydrodynamic simulations. If the mesh should be modified for a project variant or for an analysis scenario, only tasks 3 and 4 are to be redone and task 4 is completely automated in the Modeleur.

The heterogeneity of the data sources, which constitutes one of the main difficulties of the exercise, can be classified in three groups: according to the measuring technique used; according to the format or the representation model used; according to the geographic *datum* and projection system.

For the topography, the measuring techniques include conventional or radar satellite, airborne techniques, photogrammetry or laser scanning, ground techniques, total station or GPS station, as well as embarked techniques as the echo-sounder. These data come in the form of paper maps that have to be

digitised, in the form of regular or random data points, isolines of altitude, or even as transects. They can be expressed in different *datums* and projections and sometime are not even georeferenced and must be first positioned.

As for the bed roughness that determines the resistance to the flow, also here the data sets differ one from the other in many aspects. Data can here also have been picked as regular or random points, as homogeneous zones or as transects. Data can represent the average grain size of the present materials, the dimension of the passing fraction (D_{85} or D_{50} or median), the represented % of the surface corresponding to every fraction of the grain assemblage, etc. In absence of this basic data, the NTM can only represent the value of the friction parameter, typically n of Manning, which should be obtained by calibration for the hydrodynamic model.

For the vegetation present in the flood plain or for aquatic plants, source data can be as variable as for the bed roughness. Except for the cases where data exists, the model of vegetation often consists of the roughness parameter obtained during the calibration exercise.

The method was successfully applied in numerous contexts as demonstrated by the application realised on the Chicoutimi River after the catastrophic flood in the Saguenay region in 1996. The huge heterogeneity of the available data in that case required the application of such a method as proposed. So, elevation data obtained by photogrammetry, by total station or by echosounder on transects could be coordinated and investigated simultaneously for the purposes of hydrodynamic simulation or of sedimentary balance in zones strongly affected by the flood.

Key-words : *numerical terrain modelling, NTM, hydrodynamic modelling, Saguenay floods, finite elements method, TIN, geographical information system, GIS, hydroinformatic, Modeleur, software, river hydraulics, spatial analysis.*

RÉSUMÉ

L'article pose la problématique de la construction du Modèle Numérique de Terrain (MNT) dans le contexte d'études hydrauliques à deux dimensions, ici reliées aux inondations. La difficulté est liée à l'hétérogénéité des ensembles de données qui diffèrent en précision, en couverture spatiale, en répartition et en densité, ainsi qu'en géoréférentiation, notamment. Dans le cadre d'un exercice de modélisation hydrodynamique, toute la région à l'étude doit être documentée et l'information portée sur un support homogène. L'article propose une stratégie efficace supportée par un outil informatique, le Modeleur, qui permet de fusionner rapidement les divers ensembles disponibles pour chaque variable qu'elle soit scalaire comme la topographie ou vectorielle comme le vent, d'en préserver l'intégrité et d'y donner accès efficacement à toutes les étapes du processus d'analyse et de modélisation. Ainsi, quelle que soit l'utilisation environnementale du modèle numérique de terrain (planification d'aménagement, conservation d'habitats, inondations, sédimentologie), la méthode permet de travailler avec la projection des données sur un support homogène de type maillage d'éléments finis et de conserver intégralement l'original comme référence. Cette méthode est basée sur une partition du domaine d'analyse par type d'information : topographie, substrat, rugosité de surface, etc. Une partition est composée de sous-domaines et chacun associe un jeu de données à une portion du domaine d'analyse par un procédé déclaratoire. Ce modèle conceptuel forme à notre sens le MNT proprement dit. Le processus de transfert des données des partitions à un maillage d'analyse est considéré comme un résultat du MNT et non le MNT lui-même. Il est réalisé à l'aide d'une technique d'interpolation comme la méthode des éléments finis. Suite aux crues du Saguenay en 1996, la méthode a pu être testée et validée pour en démontrer l'efficacité. Cet exemple nous sert d'illustration.

Mots clés : *modélisation numérique de terrain, MNT, modélisation hydrodynamique, crues du Saguenay, méthode des éléments finis, TIN, système d'information géographique, SIG, hydro-informatique, Modeleur, logiciel, hydraulique fluviale, analyse spatiale.*

1 – INTRODUCTION

La description fidèle des caractéristiques des lits majeurs et mineurs d'une rivière est essentielle à toute simulation hydrodynamique des écoulements surtout si la gamme des débits extrêmes (crues, étiages) est visée et que l'approche bidimensionnelle est utilisée. Par exemple, les études sédimentologiques nécessitent une excellente description de la topographie transitoire et des substrats. Dans les modèles d'habitats piscicoles, la qualité des substrats est une donnée déterminante et sa caractérisation va beaucoup plus loin que le simple ajustement du paramètre de rugosité du modèle hydrodynamique (MILHOUS, 1996 ; HAMILTON et BERGERSEN, 1984). La profondeur locale est également une variable explicative fondamentale pour le calcul de la valeur de l'habitat pour les poissons (BOVEE, 1978). De même, la différence entre l'altitude du terrain et le niveau d'eau constitue la hauteur de submersion et ce facteur détermine le taux d'endommagement infligé par une crue aux bâtiments et infrastructures (EL-JABI et ROUSSELLE, 1987 ; OUARDA *et al.*, 1995).

L'élévation du terrain et les divers facteurs de résistance à l'écoulement sont des informations de base que le modélisateur doit transmettre au simulateur sous une forme qui soit compatible avec sa méthode de discrétisation. Cette tâche est trop longtemps demeurée le parent pauvre du processus de modélisation car elle ne semble pas *a priori* soulever de difficulté particulière. En pratique cependant, elle représente une somme très significative de travail pour la mobilisation des modèles surtout sur les cours d'eau naturels, en plus de receler bien des écueils susceptibles de compromettre la qualité des résultats hydrauliques. L'adage bien connu des modélisateurs « *garbage in, garbage out* » prend tout son sens à cette étape cruciale de la simulation.

De même que les champs de vitesse et de niveau d'eau constituent des résultats du modèle hydrodynamique, les champs de variable décrivant le terrain et portés sur le maillage de simulation constituent les résultats du modèle numérique de terrain (MNT). Puisqu'il s'agit à proprement parler d'un exercice de modélisation, une validation des résultats qui fait foi de la qualité du modèle est nécessaire.

Pour la simulation des crues, les particularités de la plaine inondable doivent, en plus des caractéristiques du lit mineur, être représentées par le MNT. La notion de rivière prend donc en période de débits extrêmes une signification particulière quant à l'extension du domaine de simulation. En fait, la définition même de la rivière dépend directement des débits à simuler. Si la simulation d'un débit d'étiage restreint le domaine d'écoulement au lit mineur de la rivière, plus l'événement à simuler représente des crues de faible récurrence, plus le domaine couvert par la rivière s'élargit, les limites du domaine à modéliser étant définies par les hypothèses formulées sur la hauteur atteinte en fonction

du débit. À l'étape de la modélisation du terrain, cette considération pose des difficultés pratiques et conceptuelles liées aux provenances diverses et à l'hétérogénéité des ensembles de données disponibles. D'autres considérations similaires liées aux différents contextes de modélisation en rivière nous conduiraient aux mêmes conclusions.

Le MNT se compose d'abord du Modèle Numérique d'Élévation (MNE) et de divers autres modèles numériques qui décrivent notamment, la variation spatiale des facteurs de résistance à l'écoulement comme la rugosité du lit et de la glace et de la végétation aquatique ou terrestre, selon que ces facteurs entrent en considération dans un écoulement donné. La modélisation du terrain exige généralement l'intégration d'ensembles de données sensés représenter la même variable, par exemple la topographie. Or, ces données peuvent provenir de sources diverses, le plus souvent hétérogènes par l'instrumentation utilisée, le format des fichiers, la distribution spatiale et la densité des mesures ainsi que par leur précision intrinsèque. De plus, la représentativité des données par rapport à la réalité actuelle doit être prise en considération étant donné que le lit des cours d'eau peut évoluer suite à des aménagements, ou sous l'influence des forces érosives lesquelles se manifestent puissamment en situation de crue extrême comme lors des crues du Saguenay en 1996 (Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages ou CSTGB, 1997 ; LAPOINTE *et al.*, 1998 ; LECLERC *et al.*, 1997).

Le défi de la modélisation numérique de terrain dans un contexte de simulation hydrodynamique à deux dimensions (2D) consiste à réconcilier les différents facteurs d'hétérogénéité et à porter ces données sur un support homogène permettant de mettre en œuvre le modèle hydrodynamique retenu. Si l'évocation de ce problème ne laisse pas entrevoir de difficulté théorique particulière, la réalité soumet le modélisateur à bien des difficultés liées justement aux différents facteurs d'hétérogénéité. La disponibilité d'outils spécialisés adaptés à cette tâche facilite grandement la réalisation de cette activité dans un projet de simulation hydrodynamique.

Dans cet article, nous proposons une méthodologie d'intégration de données hétérogènes pour la création du MNT en vue de la simulation hydrodynamique 2D des écoulements naturels en éléments finis. Comme nous le verrons ci-après, l'approche vise non seulement l'accès facile et le transfert efficace des données vers les simulations, mais aussi le maintien de l'intégrité des données originales. La présentation de la méthodologie est illustrée au fur et à mesure par une application à la rivière Chicoutimi (Québec, Canada) pour la simulation de la crue exceptionnelle survenue en juillet 1996 (LECLERC *et al.*, 1997 ; CSTGB, 1997). La méthodologie présentée est entièrement supportée par un logiciel, le *Modeleur*, développé à l'INRS-Eau (SECRETAN et LECLERC, 1998 ; SECRETAN *et al.*, 2000). Cet outil, qui peut être assimilé à un Système d'information géographique (SIG) dédié aux applications de la simulation 2D des écoulements permet d'accomplir toutes les étapes d'intégration des données brutes pour la conception d'un MNT complet supporté par la méthode des éléments finis. De plus, il facilite la mise en œuvre et le pilotage de simulations hydrodynamiques avec le simulateur *Hydrosim* (HENICHE *et al.*, 1999).

Après avoir procédé à un bref rappel de la méthode d'interpolation par éléments finis qui est la base technique de la méthodologie, on propose quelques définitions propres à la modélisation numérique de terrain. Par la suite, la stra-

tégie du Modeleur, qui gouverne les flux de données à partir des ensembles bruts jusqu'à la forme finale homogénéisée, est présentée et illustrée avec l'exemple de la rivière Chicoutimi.

2 – MÉTHODOLOGIE

2.1 L'interpolation par éléments finis

La méthode des éléments finis (DHATT et TOUZOT, 1981 ; ZIENKIEWICZ et MORGAN, 1983) repose sur une technique d'interpolation des données souple et puissante qui permet non seulement de représenter les valeurs mesurées d'un champ de variable, mais également de résoudre les équations de la mécanique applicables au comportement physique d'un milieu continu ou tout autre processus décrit par une forme algébrique quelconque, comme par exemple l'habitat du poisson (LECLERC *et al.*, 1995 ; GHANEM *et al.*, 1994). Cette méthode traditionnellement utilisée en ingénierie a aussi été largement reprise en cartographie et en géomatique sous la forme de TIN (Triangular Irregular Network).

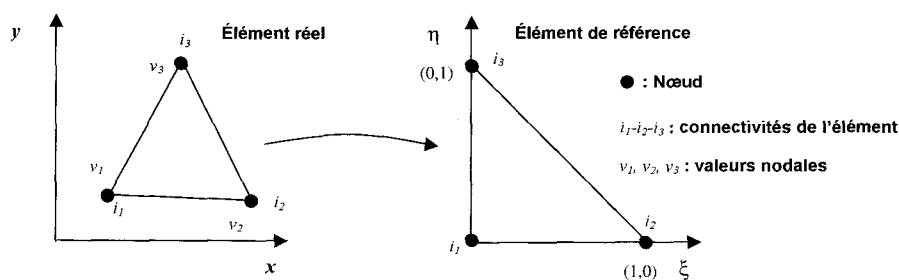


Figure 1 Constituants d'un maillage de type éléments finis (triangulaire à approximation linéaire).

Components of a finite element mesh (triangular with linear approximation).

Dans la méthode des éléments finis, le domaine de calcul est maillé en un nombre fini de sous-domaines simples qu'on appelle des éléments (figure 11). Ceux-ci couvrent tout le domaine sans se recouper ni laisser de trou. Ce sont des formes géométriques simples comme des triangles ou des quadrilatères. La géométrie de chaque élément est définie par des nœuds situés, pour les éléments linéaires, aux sommets de la forme (figure 1). En plus de leur propre localisation dans le domaine, ces nœuds portent également les données en valeur nodale, par exemple, la valeur de la topographie à l'endroit où se trouve le nœud. Sur chaque élément, on associe des fonctions d'interpolation qui, combinées aux valeurs nodales, définissent l'approximation de la donnée sur l'élément.

Bien que la forme la plus utilisée des éléments finis à deux dimensions soit le triangle à trois nœuds (T3) lequel autorise une interpolation nodale linéaire, la méthode offre un potentiel bien plus vaste pour le traitement des données en 1D, 2D ou 3D. Le lecteur pourra consulter l'ouvrage de DHATT et TOUZOT (1981) ou celui de ZIENKIEWICZ et MORGAN (1983) pour une présentation relativement accessible de la méthode. Dans le cadre de cet article, l'élément le plus utilisé est celui présenté à la *figure 1* ou une variante de celui-ci. Le schéma d'interpolation d'une variable quelconque $u(x, y)$ est représenté par les équations suivantes :

$$u(x, y) = N_1(x, y) u_1 + N_2(x, y) u_2 + N_3(x, y) u_3$$

avec, sur l'élément de référence unitaire :

$$N_i = \langle \xi, \eta, 1 - \xi - \eta \rangle ; i = 1, 2, 3 ;$$

$$0 \leq \xi \leq 1 ; 0 \leq \eta \leq 1$$

où (ξ, η) sont les coordonnées relatives de l'élément réel, c'est-à-dire, telles que transposées sur l'élément de référence.

2.2 La modélisation numérique de terrain

Les scénarios d'analyse des écoulements demandent ou occasionnent des changements fréquents et importants dans le maillage porteur des données par adaptation de la densité locale du maillage, ou des transformations locales de la morphologie du domaine liées à des aménagements. Un retour aux jeux de données de base est alors requis ce qui nécessite de les préserver intégralement (*intégrité*), et d'y avoir accès facilement (*accessibilité*) et de les transférer efficacement (*efficacité*) sur le maillage. Voilà pourquoi le MNT doit plutôt mettre l'accent sur les données de base plutôt que sur leur aspect transformé et nécessairement dégradé après leur report sur le maillage. Un critère de *compatibilité* par rapport à la structure des données intervient à ce moment.

L'*intégrité* des données doit être préservée dans la mesure du possible dans le sens où il est pour nous impératif de conserver distinctement et de donner accès séparément à des jeux de données différents. Deux campagnes de mesure ne seront pas mélangées ; par exemple, la topographie provenant de cartes numérisées sera maintenue distincte de celle provenant de campagnes d'échosondage. Cette approche permet en tout temps de revenir sur les mesures, de les contrôler, de les valider, d'y apporter des correctifs et éventuellement, de substituer un jeu de données par un autre.

Pour ce faire, l'*accessibilité* aux jeux de données doit être possible en tout temps. Les données sont le fondement du MNT, médium qui, comme tout autre modèle, doit être validé.

L'homogénéité du support de l'information en regard de la localisation des points documentés est essentielle afin de permettre l'interaction algébrique entre les diverses couches d'information. L'objectif opérationnel qui sous-tend ultimement la création du MNT dans le contexte présent est de pouvoir transférer *efficacement* les données spatiales de base (mesures, géométrie des aménagements, etc.) portées par diverses discrétisations hétérogènes vers une seule structure porteuse. Celle-ci, en plus d'être homogène vis-à-vis des données, doit s'avérer compatible (*compatibilité*) avec la méthode de discrétisation

du modèle hydrodynamique, qu'il s'agisse des éléments finis comme c'est le cas ici, ou de toute autre méthode comme les différences finies ou les volumes finis.

Avec ces objectifs d'intégrité, d'accessibilité, d'efficacité et d'homogénéité, la méthode préconisée comporte les étapes suivantes illustrées à la figure 2 :

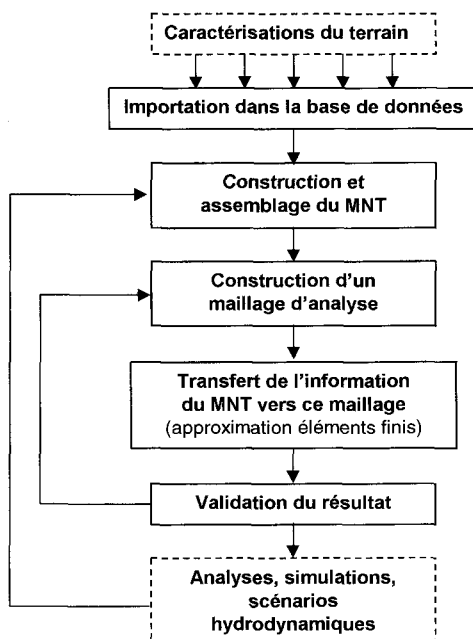


Figure 2 Méthodologie de construction du modèle numérique de terrain dans un contexte d'analyse courantométrique.

Methodology to construct the NTM in a context of flow velocity analysis.

1. *Importation des jeux de données* dans la base de données ce qui implique éventuellement la numérisation de cartes et/ou le reformatage des fichiers bruts afin d'en permettre la lecture. Cette étape peut aussi demander de construire une structure d'interpolation pour ces jeux de données afin d'en permettre le transfert ultérieur vers d'autres supports et la visualisation sous la forme d'isovaleurs. Cette structure, ici, de type éléments finis, est permanente tant que de nouvelles données ne viennent pas modifier la répartition des points déjà documentés. Une validation des données est également possible à cette étape et des correctifs peuvent y être apportés pour pallier aux insuffisances.
2. *Construction et assemblage du modèle numérique de terrain* proprement dit (figure 3) qui consiste, pour chaque variable (topographie, rugosité, etc.), à créer une partition du domaine à l'étude, c'est-à-dire à le subdiviser en sous-domaines juxtaposés et à associer à chacun le jeu de données qui décrit la variable sur celui-ci. Plus précisément, cette pro-

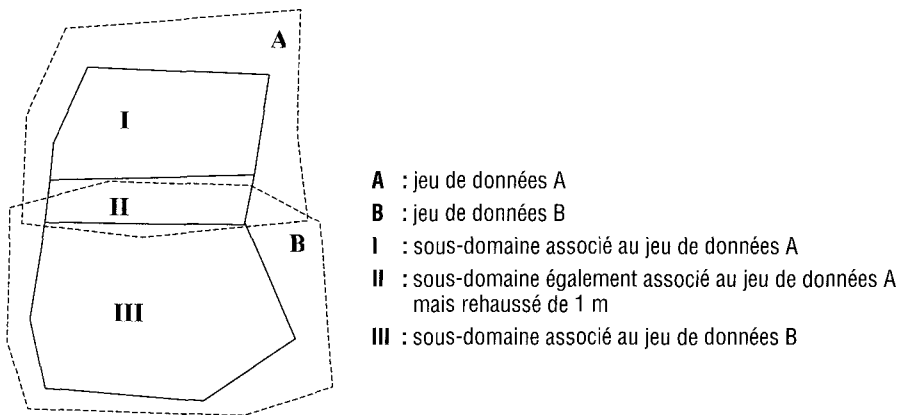


Figure 3 Construction du MNT : déclaration de partition dans le Modeleur.
 Construction of the NTM : declaration of a partition in Modeleur.

cédure déclaratoire utilise des polygones irréguliers permettant de spécifier dans les sous-domaines correspondants la source de données à utiliser dans la construction du MNT. Comme il est aussi possible de transformer des régions du domaine avec des fonctions algébriques pour représenter par exemple des aménagements en rivière, le MNT intègre tous les ensembles de données validés et les instructions pour les transformer localement. Dès cette étape, le MNT existe comme entité-modèle et il a un caractère conceptuel.

3. *Construction d'un maillage éléments finis* adapté à la représentation fidèle mais optimale des données de terrain (maillage d'analyse ou de représentation) et/ou à la tâche de simulation hydrodynamique (maillage hydrodynamique). Le maillage répond à sa propre logique, c'est-à-dire qu'il peut être adapté ou raffiné en fonction des besoins particuliers auxquels il est destiné. Il doit être localisé dans la zone commune couverte par toutes les partitions dont l'information doit lui être transférée, mais peut très bien n'en couvrir qu'un sous-ensemble.
4. *Transfert par interpolation* et assemblage des données des diverses composantes du MNT sur le maillage MEF d'après les instructions contenues dans les différentes partitions. Le résultat est une instanciation du MNT et sa qualité dépend de la densité du maillage et de la variabilité de la donnée. Il nécessite donc une validation par rapport aux données d'origine.
5. Mise en œuvre des tâches d'*analyse* et/ou de *simulation hydrodynamique* des scénarios hydrologiques et/ou d'aménagement. Si le maillage doit être modifié pour une variante d'aménagement ou pour un scénario d'analyse, seules les tâches 3 et 4 sont à refaire et la tâche 4 est entièrement automatisée dans le Modeleur.

2.3 Hétérogénéité des données de base

Revenons sur l'hétérogénéité des données de base qui constitue l'une des principales difficultés de l'exercice. Cette hétérogénéité peut être classifiée en trois groupes :

1. selon les moyens de mesure employés ;
2. selon le format ou le modèle de représentation utilisé ;
3. selon le repère géographique.

Pour la topographie, les moyens de mesure comprennent le satellite conventionnel ou radar, les moyens aéroportés, photographie ou balayage laser, les moyens terrestres, station totale ou station GPS, ainsi que les moyens embarqués comme l'écho-sondeur. Quant au format ou au mode de représentation, ces données viennent sous forme de cartes papier qu'il faudra numériser le cas échéant, sous la forme de semis de points réguliers ou aléatoires, d'isolignes d'altitude, ou encore de transects en travers du cours d'eau. Elles peuvent s'exprimer dans divers repères suivant différentes projections et *datums* et parfois, elles ne sont même pas géoréférencées ce qui nécessite alors un rattachement.

Ces différentes techniques comportent chacune des avantages particuliers de précision, de densité ou de commodité logistique mais toutes nécessitent des traitements spécifiques pour les transformer à partir du signal original et les valider. Ainsi, le capteur du signal laser reçoit pour chaque point échantillonné deux valeurs correspondant à deux écho distincts, le premier pouvant représenter la réflexion sur le couvert végétal et le second, sur le sol. Dans certains cas, les deux signaux sont faux, par exemple, lorsque le rayon rencontre le toit d'un bâtiment. Il faut donc trier ces données pour n'en retenir que la portion représentative.

En photogrammétrie, la source originale est sous forme de photographie aérienne. En gros, il faut d'abord numériser le matériel en haute précision (typiquement 1 200 d.p.i.), rectifier la déformation optique de l'image par aéro-triangulation et calibrer l'altitude du terrain visible sur l'image pour obtenir un *modèle photogrammétrique* de la zone avant de pouvoir en extraire l'information à l'aide d'outils informatiques appropriés (NOLETTE *et al.*, 1992). La qualité et la précision du résultat dépendent de l'altitude du survol et des spécifications du devis d'extraction. En fonction d'une utilisation ultérieure en modélisation hydrodynamique, il est préférable de recueillir les données en *semis aléatoire adaptatif* plutôt qu'en forme d'isovaleurs d'altitude comme c'est le cas habituellement : aléatoire car les points n'ont pas besoin de suivre une structure prédéfinie et adaptatif car la densité est adaptée aux variations du terrain. On n'en a cependant pas toujours le loisir et il arrive que les données disponibles sont déjà en format de carte d'isovaleurs et qu'il faille les numériser ainsi.

Les données prélevées directement au sol par échosondeur ou à la station totale donnent également lieu à des transformations. Ainsi, les données d'échosondeur donnent la profondeur directement mais l'obtention de l'altitude du point correspondant nécessite une opération dite de *réduction* qui tient compte de l'élévation du plan d'eau au moment de la mesure (FORRESTER, 1983) ce qui peut s'avérer délicat en conditions de crue ou de marée ou dans les régions rapidement variées de l'écoulement. Cette donnée complémentaire

est obtenue soit par limnimétrie directe (règle ou enregistreur de niveau) ou encore, par le signal de positionnement en 3D du GPS. Pour ces modes de caractérisation, nous privilégions toujours le semis aléatoire adaptatif de points plutôt que les transects. La première méthode est moins contraignante sur le plan logistique en plus de procurer une représentation mieux adaptée de la variabilité du milieu. De plus, il est toujours possible de dégénérer cette information en transects si un besoin comme l'application du modèle HEC-RAS (USACE, 1990) l'exige.

Pour ce qui est de la rugosité du lit qui détermine la résistance à l'écoulement, on est ici également en présence d'ensembles de données qui diffèrent les uns des autres à plusieurs égards : structure spatiale, type de variable représentée, format, couverture spatiale, etc. À l'instar de la topographie, les données peuvent avoir été cueillies sous la forme d'un semis de points aléatoire ou systématique, de zones homogènes ou de transects. Du point de vue de la variable caractérisée, la donnée peut représenter la granulométrie moyenne des matériaux présents, la dimension de la fraction passant (le D_{85} ou le D_{50} ou la médiane), le % de la surface représentée correspondant à chaque fraction de la granulométrie, etc. En absence de cette donnée de base, le MNT peut ne représenter que la valeur du paramètre de frottement, typiquement le n de Manning, qui doit être ajusté pour le modèle hydrodynamique.

Pour la végétation présente en zone inondable ou pour les plantes aquatiques, les données de base peuvent être aussi variables que la rugosité du lit. Sauf dans les cas précis où la donnée existe comme sur le fleuve Saint-Laurent (MORIN *et al.*, 2000), le modèle de végétation est souvent constitué par le paramètre de rugosité obtenu lors de l'exercice de calibration.

Sans insister davantage sur cette très grande hétérogénéité des données, on doit retenir ici que la méthodologie utilisée pour les intégrer efficacement sur un support homogène tout en préservant leur intégrité n'est pas triviale et méritait qu'on y réfléchisse attentivement.

3 – TRAITEMENTS PARTICULIERS ET RÉSULTATS SUR LA RIVIÈRE CHICOUTIMI

3.1 Données disponibles pour la modélisation de terrain

Pour les fins de simulation hydrodynamique et du bilan sédimentaire suite aux crues du Saguenay (CSTGB, 1997 ; LECLERC *et al.*, 1997 ; GAUTHIER *et al.*, 1997), le domaine d'étude de la rivière Chicoutimi, une des rivières étudiées dans le cadre de ce mandat, s'étendait du barrage Portage-des-Roches jusqu'au barrage Elkem-Métal, soit un tronçon de 22 km de longueur pouvant aller jusqu'à 400 m de largeur en comprenant la plaine d'inondation touchée par la crue de 1996 (*figure 4*). Dans le présent contexte, les données requises comprennent principalement l'altitude du terrain (topographie) et les caractéristiques de rugosité des surfaces d'écoulement liées à l'occupation du sol et à la végétation dans le lit majeur ou à la granulométrie des matériaux du lit mineur. Nous allons les aborder à tour de rôle pour en illustrer le traitement.

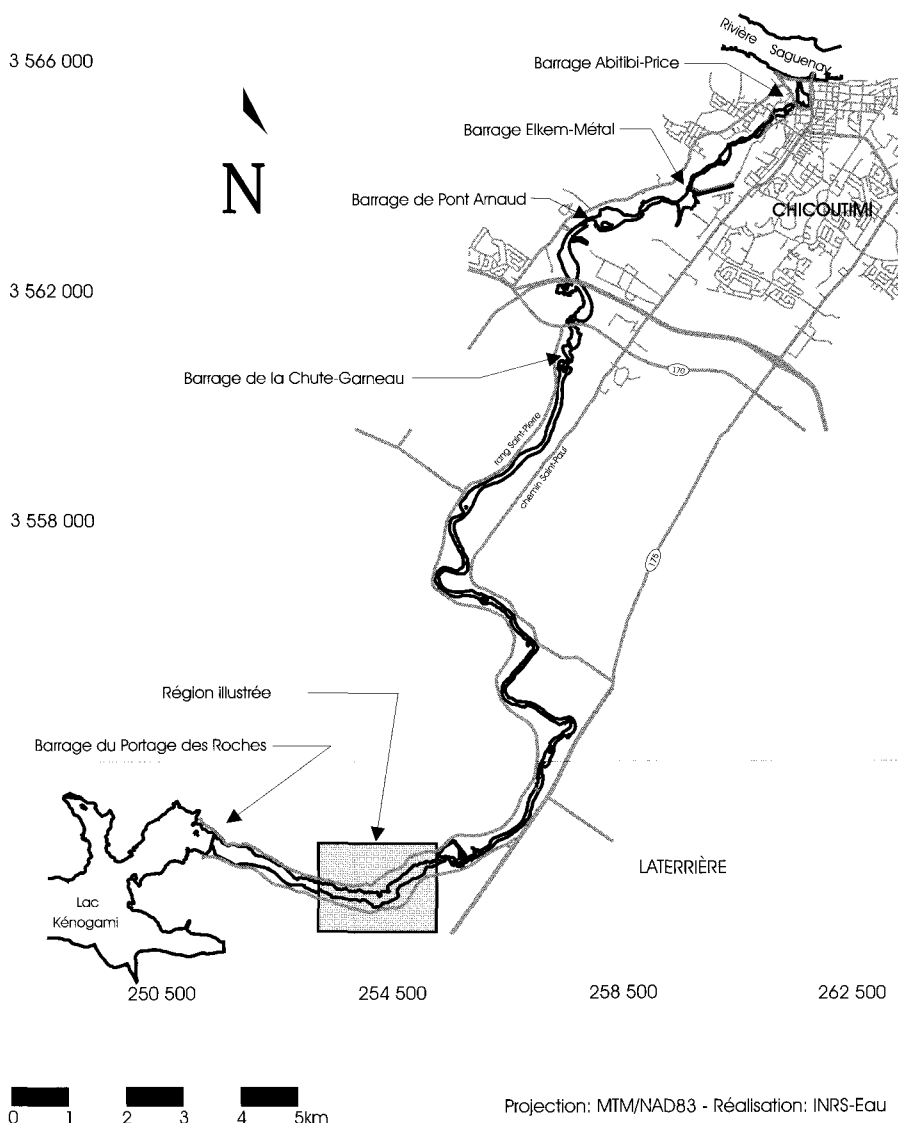


Figure 4 Carte du tronçon à l'étude de la rivière Chicoutimi suite aux crues du Saguenay en 1996.

Map of the Chicoutimi River reach under study, after the Saguenay flood events in 1996.

3.1.1 Données topographiques

Divers ensembles de données permettaient de décrire, chacun partiellement, ce domaine dans son état préexistant avant la crue de 1996. L'obtention d'une carte synoptique couvrant l'ensemble du domaine nécessitait un patient travail d'intégration tel que présenté précédemment. Considérons ces diverses sources :

Lit mineur caractérisé par transects : dans le cas de la rivière Chicoutimi, la topographie du lit mineur avait été caractérisée sur 82 sections transversales en vue de réaliser des simulations hydrodynamiques unidimensionnelles. Le but était de délimiter les zones inondables de récurrence 20-100 ans dans la cadre de la Convention Canada-Québec (CHAMBERLAND *et al.*, 1993) avec le programme HEC-2 (United States Army Corps of Engineers, 1990), et d'étudier avec le programme DAMBRK (FREAD, 1984) les conséquences d'une rupture du barrage Portage-des-Roches situé en amont de la zone d'étude (HOANG, 1990 ; Hydro-Québec, 1992). Le profil du lit de la rivière avait été établi par échosondage et les berges relevées par arpentage classique. Le format de ces données brutes consistait en un ensemble de transects localisés sur cartes à l'échelle 1:20 000 et composées de points pour lesquels on connaissait la distance les séparant de l'origine de la section ainsi que l'élévation géodésique du terrain. En plus de n'être pas géoréférencées dans le plan, ces données n'étaient pas disponibles sous forme numérique mais seulement sous forme de cartes papiers. Une portion de la structure de ces données est représentée à la figure 5. Si elles offrent une couverture latérale suffisamment représentative de la variabilité transversale du lit, il est notable que toutes ces données de transects laissent parfois à désirer dans l'axe longitudinal du moins dans une perspective de modélisation 2D.

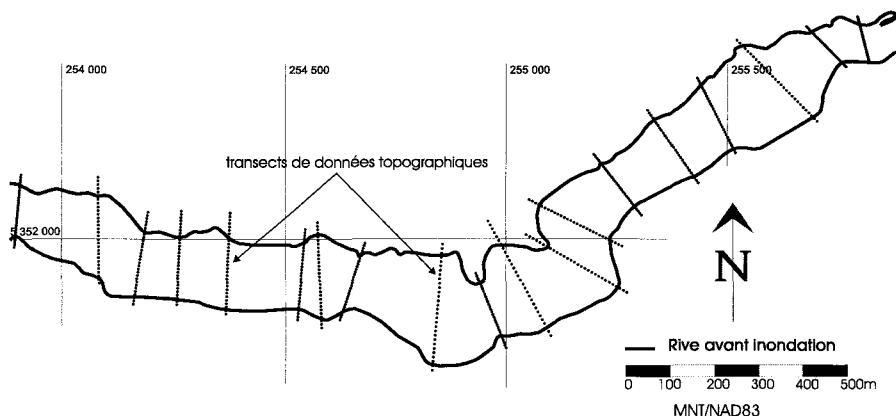


Figure 5 Sections transversales du lit mineur (incluant les sections intercalées) dans un secteur de la rivière Chicoutimi.

Transects of the main channel (with added intermediate sections) in a sector of the Chicoutimi River.

Plaine inondable : la topographie de la plaine inondable de la rivière Chicoutimi antérieure aux événements de 1996 a été caractérisée par photogrammétrie à partir de photos aériennes à l'échelle 1:15 000 acquises en 1994 et 1996 et traitées pour les fins de l'étude en 1997 à l'aide du logiciel DVD (NOLETTE *et al.*, 1992). Par définition, ces données sont géoréférencées (projection MTM, NAD83) et sous format numérique. Le semis de points ainsi obtenu comportait 29 339 points pour les photos 1996 et 4 075 pour 1994, ensembles qui ont été fusionnés pour l'importation dans la base de données. Le résultat

se caractérisait par une distribution spatiale généralement régulière avec une augmentation de la densité aux endroits où la pente du terrain s'accroissait. L'élévation en chacun des points a été déterminée avec une précision de ± 75 cm. Une portion de ce semis de points est représentée à la figure 6.

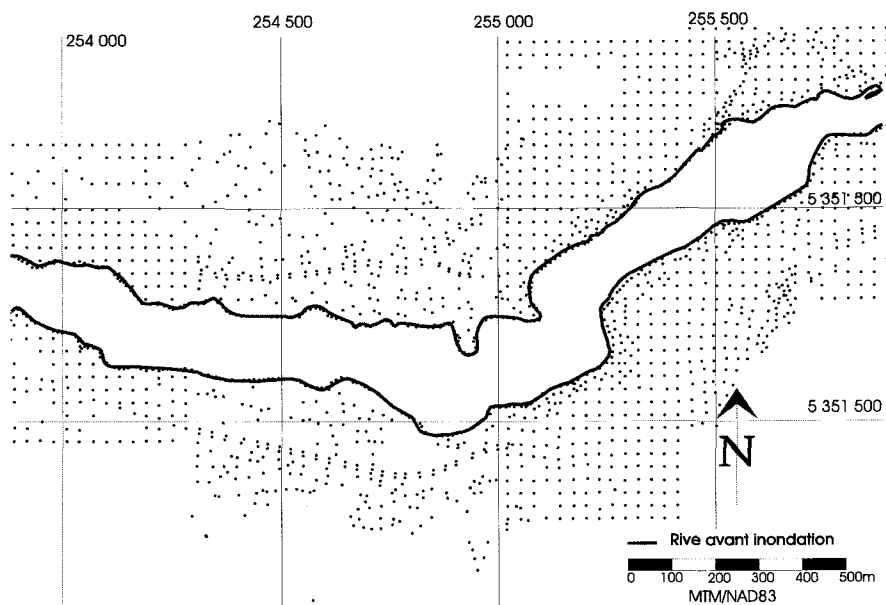


Figure 6 Semis de points photogrammétriques du lit majeur dans un secteur de la rivière Chicoutimi.

Photogrammetry data points of the flood plain in a sector of the Chicoutimi River.

À ces divers ensembles s'ajoutent les données postérieures aux crues de 1996 et montrant les variations du lit du cours d'eau suite au contournement des ouvrages de Chute Garneau et de Pont-Arnaud. Ces données ont permis de faire ressortir le résultat de la phase transitoire d'érosion du lit et des berges, surtout dans la région des ouvrages de Pont-Arnaud et de Chute-Garneau en plus d'établir le bilan sédimentaire consécutif à ces changements ; elles n'ont pas servi aux simulations hydrodynamiques. LAPOINTE *et al* (1999) ont d'ailleurs publié un article à ce sujet pour les bouleversements survenus sur la rivière Ha ! Ha ! Pour décrire l'état de ces régions sur la rivière Chicoutimi, nous disposons, en plus des données décrites précédemment pour les sous-régions invariantes, des ensembles suivants :

Lit mineur caractérisé par semis aléatoire : 2 859 points distribués aléatoirement relevés par échosondage et arpentage dans le lit mineur de la rivière (Hydro-Québec, 1996) au voisinage des ouvrages de Chute Garneau et de Pont-Arnaud. Ces données étaient entièrement géoréférencées, latitude-longitude dans le plan et cote d'altitude ;

Lit mineur caractérisé par transects : 31 sections transversales (10 200 points) plus récentes (Hydro-Québec, 1996) et géoréférencées en latitude-longitude dans la région immédiate des ouvrages de Chute-Garneau et de Pont Arnaud.

Lit majeur et lit mineur exondé : un semis de points photogrammétriques extraits de photographies aériennes prises après la crue de 1996 une fois que les eaux se furent retirées. Les photographies disponibles ont été prises à l'échelle 1:10 000 ce qui permet de caractériser la topographie avec une précision de plus ou moins 0,5 m aux points d'extraction.

Étant donné que deux états étaient décrits par le modèle, soit avant et après le déluge, deux modèles numériques d'élévation ont été élaborés, les deux ayant en commun des segments invariants ayant échappé aux dommages de la crue.

3.1.2 Données pour la résistance à l'écoulement

Les données disponibles pour construire le modèle de terrain sur la rivière Chicoutimi étaient assez sommaires en regard des facteurs de résistance à l'écoulement. Tout au plus pouvait-on compter sur les cartes topographiques au 1:20 000 du ministère des Ressources naturelles du Québec représentant les principales classes d'occupation du sol pour la partie terrestre ou lit majeur : zone résidentielle avec végétation arborescente, boisé, champ en culture. Dans le lit mineur, bien qu'il soit préférable de compter sur des données sur la taille des substrats présents, seule une reconnaissance terrain sommaire des principaux types de faciès d'écoulement était possible pour ce facteur : rapides, écoulement uniforme dans un segment chenalisé, segment graduellement varié à l'amont d'un ouvrage de retenue. Ces différents faciès, associés à une pente caractéristique de la ligne d'énergie, procurent une indication minimale mais suffisante en première approximation pour estimer la rugosité du fond générée par les substrats et les macro-rugosités. Comme nous le verrons plus loin, la variable du modèle de terrain est dans ce cas fournie directement sous la forme d'un coefficient « n » de Manning.

3.1.3 Autres ensembles de données

Étant donné que la rivière Chicoutimi ne supporte pas de végétation aquatique en quantité significative par rapport à l'écoulement, cette donnée ne forme pas une constituante de son MNT. Il en est de même pour la glace et le vent dans le cadre de cette étude.

3.2 Le modèle numérique d'élévation (MNE)

3.2.1 Organisation des données en éléments finis pour fins d'interpolation

Dans le Modeleur, l'organisation des points de mesure en maillages de type éléments finis est un pré-requis au report ultérieur des données par interpolation sur les maillages d'analyse. Elle consiste en la création, pour chaque ensemble de données d'élévation ou autres, d'un maillage d'interpolation où les nœuds sont la plupart du temps les points de mesure dans leur forme originale ou adaptée au traitement. Pour les semis de points, ce maillage d'interpo-

lation est créé automatiquement à l'importation par triangulation de Delaunay (BAKER, 1987). Pour les transects dans le lit mineur, une procédure spéciale a été développée.

Considérons d'abord les données non-géoréférencées de transects dans le lit mineur. Afin de géoréférencer les transects dans un repère à deux dimensions sur la rivière Chicoutimi (*figure 5*), les coordonnées des extrémités des sections ont dû être numérisées et la position des points intermédiaires a été établie par interpolation linéaire. De plus, les sections mesurées n'étant pas suffisantes en nombre pour décrire adéquatement la sinuosité des méandres de la rivière ainsi que ses nombreux élargissements et rétrécissements, il a été nécessaire d'intercaler entre les sections de mesure des sections intermédiaires artificielles dont le nombre variait en fonction de la courbure et des particularités locales du lit mineur. Il aurait bien sûr été préférable de caractériser ces sections sur le terrain mais l'urgence des travaux de la « Commission Nicolet » (CSTGB, 1997) ne le permettaient pas. Bien que n'apportant pas d'information additionnelle sur la topographie du lit en z, ces sections additionnelles permettent au moins de restituer la morphologie du cours d'eau dans le plan. L'élévation du lit est interpolée linéairement d'après la distance longitudinale relative entre deux sections de mesure.

Pour organiser l'interpolation ultérieure des données, il est possible de construire un maillage de type régulier. Ce maillage permet de raccorder par des triangles les nœuds de deux sections transversales adjacentes afin de combler le vide entre celles-ci à l'aide du schéma d'interpolation. Une telle méthode d'ordonnement offre l'avantage d'assurer le confinement du maillage à l'intérieur du domaine couvert par les sections transversales. On peut voir à la *figure 7* une portion du maillage structuré construit sur la rivière Chicoutimi avec les points des sections transversales, incluant les sections artificielles intermédiaires.

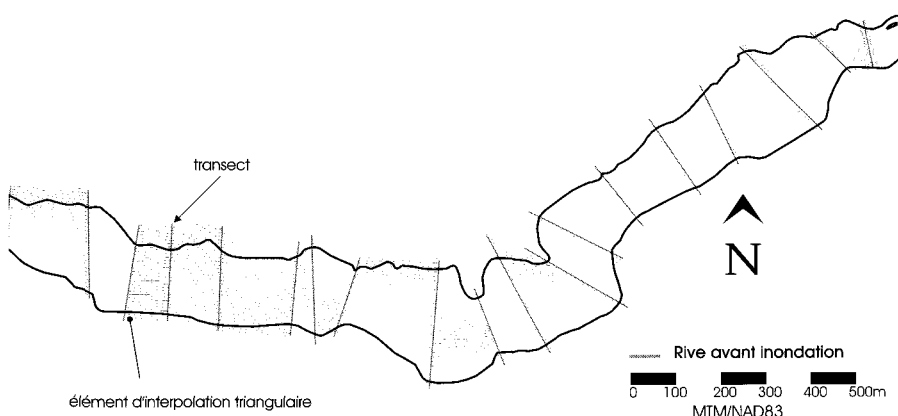


Figure 7 Maillage structuré d'éléments finis du lit mineur dans un secteur de la rivière Chicoutimi.

Structured finite element mesh for the main channel in a sector of the Chicoutimi River.

Afin de faciliter la génération du maillage structuré, on débute par l'homogénéisation des données de toutes les sections, originales et intermédiaires, en termes de nombre de points par section et d'uniformité de distance entre les points d'une même section. Le nombre de points par section homogène doit être significativement plus grand que le nombre de points initial afin d'assurer un transfert représentatif. De plus, étant donné que le nombre de points de mesures d'une section varie au départ de l'une à l'autre avant d'être ramené à un nombre constant, la position et l'élévation des nouveaux points doit être interpolée entre ces points de mesure originaux. Quant à l'élévation des points des sections intermédiaires artificielles, elle est interpolée linéairement sur la base de la distance relative entre les points correspondants des sections originales.

Le traitement préparatoire des semis de points aléatoires ou réguliers est tout à fait différent. On peut voir à la *figure 8* une partie du maillage construit automatiquement par le modèleur à partir des points obtenus par photogrammétrie. L'algorithme utilisé est celui de Delaunay (BAKER, 1987) lequel permet de trianguler les points de mesure selon un schéma unique de connectivités. Ce maillage transporte la topographie de la plaine inondable de la rivière Chicoutimi et uniquement celle-ci. Puisque tous les points de cette source de données sont situés sur la plaine inondable, les mailles traversant la rivière ne sont pas représentatives de la topographie du lit mineur. Toutefois, en utilisant la procédure déclaratoire associée aux partitions, ces éléments sont exclus du MNT. Il en est de même des mailles connectant les points situés en périphérie du domaine dans les segments concaves comme les méandres. Ces mailles sont en fait extérieures au domaine et doivent être ignorées.

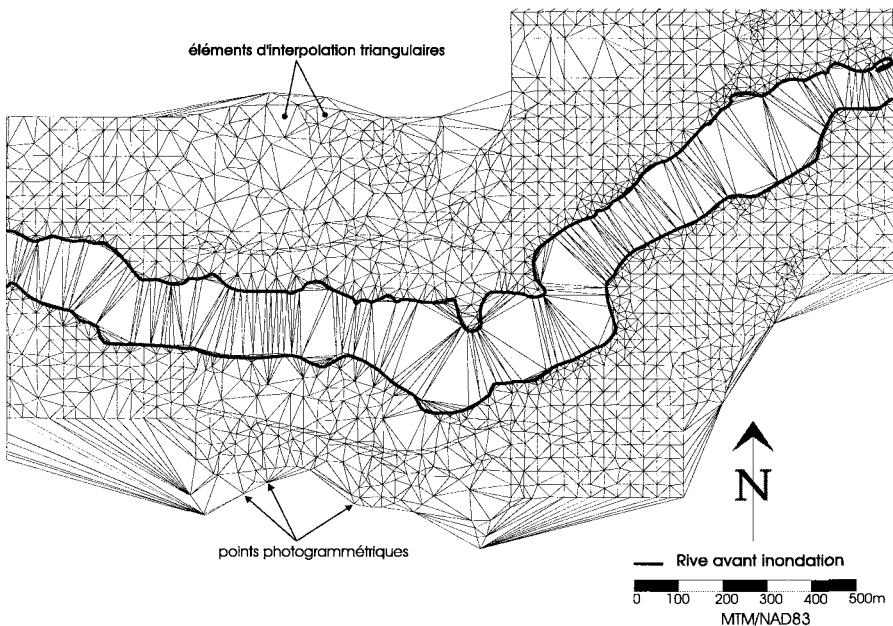


Figure 8 Maillage de Delaunay sur le semis de points photogrammétriques dans un secteur de la rivière Chicoutimi.

Delaunay triangulation based on the photogrammetry data points in a sector of the Chicoutimi River.

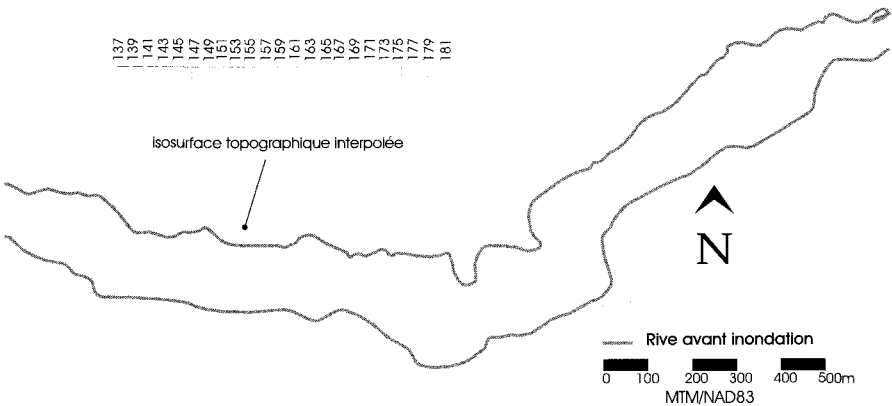


Figure 9 Topographie du MNT telle que représentée sur le maillage régulier du lit mineur (transects).
Topography of the NTM as represented on the regular structured mesh of the main channel (transects).



Figure 10 Topographie du MNT telle que représentée sur le maillage de Delaunay (semis de points).
Topography of the NTM as represented on the Delaunay triangulation (data points).

Dans le Modeleur, l'interpolation entre les nœuds des éléments permet de visualiser l'élévation du terrain telle que définie par les différentes structures

d'éléments finis. À titre d'exemple, la *figure 9* présente la topographie du lit mineur interpolée sur le maillage régulier des sections transversales tandis que la *figure 10* illustre les élévations interpolées sur le maillage irrégulier de type Delaunay de la plaine inondable.

3.2.2 Déclaration de la partition de topographie

Une fois les données d'élévation recueillies et réorganisées en maillage d'interpolation dits « serveurs », la confection du modèle de terrain de topographie, qui est une procédure déclaratoire, permet de sélectionner graphiquement, et par sous-domaine, lesquelles de ces données seront intégrées au MNE dans le cadre d'une partition. La procédure consiste tout d'abord en la subdivision du domaine étudié en un nombre limité de zones, ou sous-domaines, qui prennent la forme de polygones irréguliers. Par la suite, la source de données dans laquelle devront être puisées les données d'élévation sur chacune de ces sous-domaines est déclarée (*figure 3*). Il est entendu que la source sélectionnée doit recouvrir l'ensemble du sous-domaine auquel elle est associée dans la déclaration. Lorsque deux ou plusieurs structures de données se recoupent dans l'espace, il est possible de sélectionner dans le Modeleur une de celles-ci pour intégration au MNE. Le choix des points à inclure dans chaque zone dépend de leur distribution spatiale ainsi que de leur précision relative. Dans l'exemple théorique de la *figure 3*, la structure A est retenue pour le sous-domaine I, la structure B est utilisée sur le sous-domaine III et la structure A rehaussée de 1 mètre alimente en données le sous-domaine II.

Pour la rivière Chicoutimi, le semis de points photogrammétriques a été sélectionné sur les sous-domaines couvrant la plaine inondable. Quant aux données d'élévation du lit mineur, on se rappelle qu'elles se composaient de sections transversales et de quelques semis de points. Puisque ces derniers affichaient une densité d'information plus élevée que les sections transversales, ils ont été retenus sur les sous-domaines où ils étaient disponibles. Les points des sections transversales ont finalement été adoptés sur les sous-domaines résiduels.

À ce point, le modèle numérique d'élévation est à toute fin utile construit et on peut commencer à s'en servir en hydrodynamique ou pour d'autres fins d'analyse. Pour ce faire, il est requis de porter le modèle sur une structure unique qui, seule, peut permettre de mettre les couches de données en interaction entre elles. C'est le *maillage de représentation ou d'analyse* pour les calculs simples ou le *maillage hydrodynamique* pour les simulations de ce type.

3.2.3 Construction de maillage et report des données du MNT pour fins d'analyse

Grâce aux fonctionnalités du Modeleur, le maillage récepteur, élaboré en général en vue d'une modélisation hydrodynamique, peut être construit à l'aide d'une procédure déclaratoire semblable à celle utilisée pour la sélection des structures donneuses du MNT. En effet, la partition de maillage permet, en fonction des besoins locaux d'information dans un sous-domaine, ou de la redondance de l'information qui s'y trouve, de spécifier une densité spatiale de mailles d'éléments finis triangulaires adaptée au problème à résoudre. La densité des mailles est spécifiée aux sommets du polygone et interpolée logarith-

miquement le long de ses arêtes. Le maillage est ensuite généré automatiquement à partir de ces informations.

Les critères de définition du maillage dépendent de la précision locale recherchée et de l'usage auquel le maillage est destiné. Ainsi, il est possible de construire un maillage de représentation graphique qui ne servira qu'à la visualisation du MNE ou à des calculs simples. Dans ce cas, la fidélité de la représentation et la durée raisonnable d'affichage des résultats s'imposent comme critères de construction. D'ailleurs, dans le *Modeleur*, il est possible de visualiser simultanément sous la forme d'isolignes les données originales et leur représentation dans le MNE, ce qui permet de valider le résultat. Lorsqu'un maillage doit plutôt servir à une simulation hydrodynamique, on parle d'un maillage hydrodynamique, que rien en soi ne distingue d'un maillage de représentation, sauf le motif d'élaboration. La durée des calculs qui résultera de sa taille est alors un critère de construction qui tend plutôt à limiter celle-ci à des proportions acceptables pour le problème à résoudre.

Par exemple, le maillage utilisé lors des simulations sur la rivière Chicoutimi a été construit de manière à ce que la densité des éléments soit accrue à l'intérieur du lit mineur de la rivière, aux environs des barrages et des ponts, ainsi qu'aux endroits où la pente du terrain s'accroissait. Le maillage ainsi conçu était composé d'environ 15 000 éléments. Un maillage de représentation d'environ 30 000 éléments a également été construit (*figure 11*).

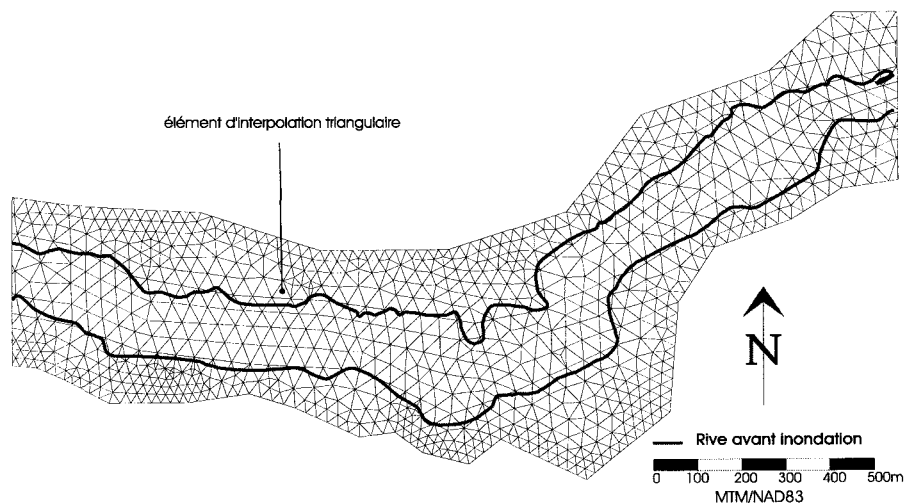


Figure 11 Maillage d'analyse dans un secteur de la rivière Chicoutimi.
Mesh for analysis purposes in a sector of the Chicoutimi River.

Le résultat final de la modélisation de terrain pour la topographie est obtenu par la projection des données d'élévation sur le maillage récepteur. Lors de l'assemblage, les données des maillages serveurs sont projetées par interpolation sur chaque nœud du maillage client récepteur. Le résultat est une instantiation du modèle de terrain, et le transfert des données du modèle original sur un maillage, qu'il soit hydrodynamique ou de représentation, entraîne une transformation de cette information, et éventuellement une perte de précision

puisque les nœuds du maillage récepteur ne sont pas des points de mesure mais des points interpolés. Une seconde validation est donc nécessaire afin de vérifier l'adéquation du transfert.

Techniquement, une boucle automatisée d'interpolation du Modeleur recherche pour chaque nœud du maillage client le sous-domaine de la partition topographique à l'intérieur duquel le nœud est situé. De cette façon, l'algorithme associe le nœud à un fichier-source et à son maillage serveur, tel que spécifié dans le MNT. L'algorithme recherche par la suite à l'intérieur de quelle maille se situe le nœud du maillage client. Finalement, l'élévation à ce nœud est interpolée linéairement à partir des élévations des trois nœuds-sommets de l'élément serveur. Cette procédure est répétée pour tous les nœuds du maillage client. Et elle est similaire pour toutes les variables considérées.

On peut voir à la *figure 12*, la topographie qui résulte de l'intégration des structures donneuses sur le maillage de représentation de la *figure 11*.

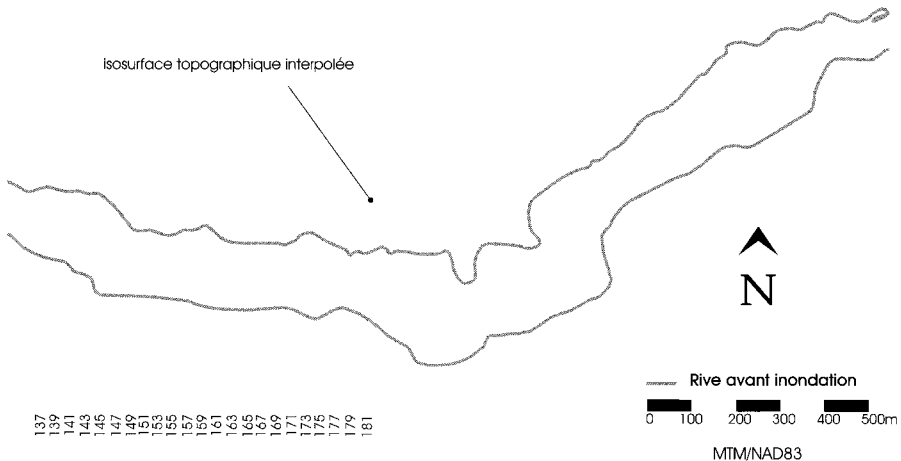


Figure 12 Le champ topographique résultant du modèle numérique de terrain porté sur le maillage d'analyse.

Topography field resulting from the transfer of the NTM to the analysis mesh.

3.3 Les modèles de facteurs de rugosité

En plus du MNE, le MNT d'une simulation hydrodynamique doit inclure un ou des modèles de rugosité. La construction de ce modèle consiste aussi à partitionner le domaine d'analyse en accord avec les différentes sources de données disponibles sur les facteurs de rugosité : la taille des substrats, le type de végétation terrestre ou aquatique, la glace, ces deux derniers étant bien sûr optionnels par rapport au contexte. Pour des fins d'homogénéisation, chacun de ces facteurs sera converti en rugosité en accord avec les lois de comportement régissant l'interaction entre le facteur et l'écoulement. Dans le cas de la glace, la donnée portée par le modèle comprend l'épaisseur du couvert ce qui permet d'en tenir compte explicitement dans les calculs hydrodynamiques.

Pour chaque modèle, le domaine de calcul est d'abord partitionné en un nombre limité de sous-domaines puis, les données sont attribuées comme valeur constante sur chacun, qu'il s'agisse de la description complète du facteur, ou de sa conversion en paramètre de frottement. Ensuite, le maillage d'analyse vient s'alimenter à ces partitions. Chaque nœud du maillage se voit attribuer une ou des valeurs nodales de paramètre de frottement en provenance du sous-domaine de la partition où il est situé. En absence de données sur le facteur considéré, le modèle correspondant se limite à une valeur de paramètre obtenue par ajustement.

En d'autres mots, le Modeleur comporte deux possibilités de construction pour le modèle de rugosité : directe ou indirecte. Sur chacun des sous-domaines, il est possible de définir directement la valeur du paramètre par ajustement, ou encore, de la lier algébriquement au facteur visé si la donnée décrivant ce facteur existe dans le modèle. Le coefficient de frottement est alors déduit par une formule empirique quelconque puisée dans la littérature. Les deux possibilités peuvent cohabiter dans le même modèle.

Notons qu'en modélisation bidimensionnelle, le frottement est une propriété locale de l'écoulement. Il n'est donc pas nécessaire de recourir à un coefficient de frottement pour représenter artificiellement les particularités de la rivière comme les convergences et les divergences, tel que requis par la simulation unidimensionnelle.

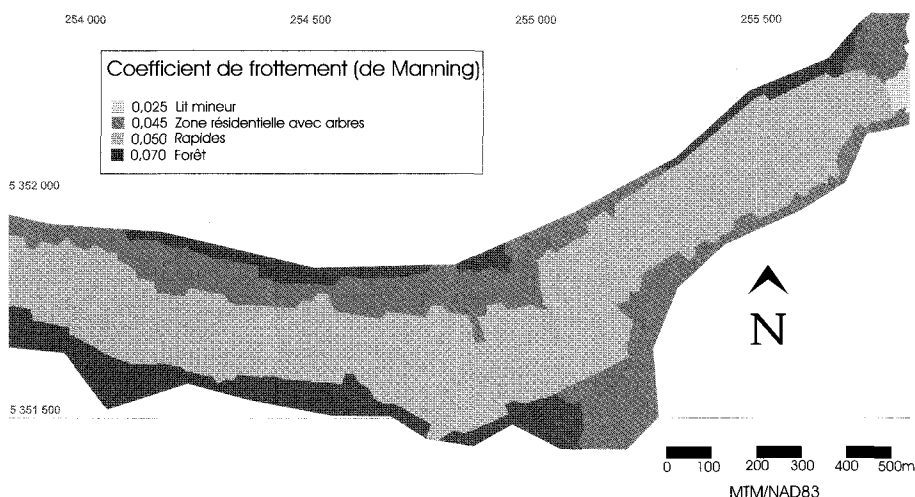


Figure 13 Modèle numérique de la rugosité hydraulique dans un secteur de la rivière Chicoutimi.

Numerical model of the hydraulic friction coefficient in a sector of the Chicoutimi River.

Pour la simulation de la crue de 1996 sur la rivière Chicoutimi, il n'était pas nécessaire de prendre en compte les plantes aquatiques et la glace, ces deux facteurs étant absents. La figure 13 montre une portion du modèle de rugosité dans le domaine d'étude. Les coefficients de frottement ont été spécifiés selon la méthode directe sur chaque sous-domaine de la partition de frottement. Un

coefficient n de Manning variant de 0,035 à 0,038 a été alloué à la plaine inondable, selon que le sol était occupé par des routes et des constructions résidentielles, ou boisé. Le lit mineur de la rivière s'est vu attribuer une valeur de 0,025, sauf dans certains rapides qui ont reçu la valeur de 0,033.

Signalons ici d'autres applications (notamment, MORIN *et al.*, 2000) qui ont permis de développer et tester l'option plantes aquatiques du Modeleur dans le contexte de la modélisation hydrodynamique du fleuve Saint-Laurent entre Cornwall et Trois-Rivières. L'importance de ce facteur y est telle par rapport à la répartition des écoulements que l'exercice de modélisation des plantes aquatiques a représenté la majeure partie de l'effort de caractérisation et de construction du modèle de terrain.

De même, une application par RIOUX (2000) a permis de mettre en œuvre l'option indirecte pour le modèle de rugosité de la rivière Sainte-Marguerite (Saguenay). Dans ce cas, le pourcentage de présence des différentes fractions granulométriques dans un sous-domaine donné constitue la variable primitive du modèle de substrat et diverses options de traitement de ces données axées sur le pourcentage médian ou le D_{85} ont été utilisées pour convertir le facteur en paramètre de rugosité et l'insérer dans le modèle hydrodynamique. De plus, suite aux simulations hydrodynamiques, le modèle de substrat a été réutilisé dans sa forme primitive dans l'analyse des habitats des juvéniles du saumon atlantique (GUAY *et al.*, 2000).

3.4 Le modèle de vent

Pour les simulations sur la rivière Chicoutimi, les forces du vent n'ont pas été considérées. Dans le Modeleur, il est cependant possible de construire un *modèle de vent* sous forme de partition de vent, qui peut porter la donnée disponible par sous-domaine et la transférer au modèle de simulation hydrodynamique de la même manière que la procédure utilisée pour la topographie et la rugosité. Contrairement aux autres composantes du modèle de terrain qui sont scalaires, la variable primitive du modèle de vent est la vitesse, donc une variable comportant deux composantes vectorielles en x et y . La conversion sous la forme d'une sollicitation pour usage dans les simulations hydrodynamiques s'effectue à partir d'une loi de comportement empirique dont celle de WU (1969, d'après SHANAHAN et HARLEMAN, 1982) constitue un exemple.

3.5 Les conditions aux limites pour la simulation hydrodynamique

Dans la méthodologie proposée, tout champ de variable, scalaire ou vectoriel, peut être pris en charge dans le cadre d'un modèle à partition qui lui est propre comme c'est le cas pour la topographie, la rugosité ou le vent. Cette approche est également applicable aux conditions aux limites qui sont une donnée essentielle à la simulation hydrodynamique et qu'on ne retrouve qu'aux frontières du domaine d'analyse. Les conditions aux limites reflètent les conditions du terrain à l'amont et à l'aval du modèle hydrodynamique (débit entrant, relation niveau-débit, niveau de sortie) ainsi qu'aux berges (imperméabilité, glissement) lesquelles forment autant de sous-domaines spécifiques.

Afin de préserver l'intégrité de ces données et surtout, en vue d'en faciliter la mobilisation ultérieure dans le simulateur hydrodynamique, le patron de condition aux limites est entrée dans la base de données aux segments fron-

tières de la partition du maillage de calcul. Ainsi, les paramètres de densité de maillage peuvent changer et le patron demeurer le même. Ce n'est que suite à la construction du maillage que ces informations seront projetées sur les nœuds-frontières du maillage.

4 – CONCLUSION

La modélisation numérique de terrain apparaît comme une tâche très délicate et laborieuse dans le contexte d'études hydrauliques plus particulièrement celles reliées aux risques d'inondation. La principale difficulté est liée à la grande diversité des ensembles de données de base disponibles lesquels présentent souvent de forts caractères d'hétérogénéité tant par le format, la précision intrinsèque, la structure spatiale de distribution que par la représentativité par rapport aux conditions évolutives du milieu (érosion, sédimentation).

La recherche a permis de mettre au point une méthodologie qui respecte l'intégrité des données de base en y donnant accès directement à toutes les étapes d'un processus d'analyse. Cette méthode est basée sur l'introduction d'un modèle conceptuel, étape intermédiaire entre la donnée elle-même et sa forme utilisable dans différents contextes d'analyse. Ce modèle qui représente le cœur de la modélisation numérique de terrain, comprend une partition en sous-domaine de la région à l'étude et une déclaration qui permet d'associer à chaque sous-domaines une source d'information qui sera utilisée par la suite pour assembler un résultat synoptique, soit une carte du domaine d'étude pour chaque variable du modèle.

La méthode est axée techniquement sur l'utilisation de la méthode des éléments finis comme outil d'interpolation à toutes les étapes du flux de données. Les différents ensembles de mesures sont d'abord organisés selon cette structure particulière afin de les rendre plus facilement donneurs d'information. Ensuite, la possibilité de construire des maillages de représentation ou hydrodynamiques clients totalement distincts de ceux reliant les points de mesure et d'y projeter les données de base, permet d'assembler toutes les couches d'information du modèle numérique de terrain sur le même support. L'analyse des données est dès lors énormément facilitée, que ce soit une analyse par des fonctions algébriques simples comme celles utilisées pour faire un bilan sédimentaire, ou par des modèles plus complexes comme la résolution des équations différentielles de Saint-Venant. Le bilan sédimentaire est obtenu en assemblant sur une maillage recouvrant la zone d'intérêt les topographies antérieure et postérieure à l'événement, en calculant la différence et en intégrant cette différence sur la surface de la zone. La procédure d'élaboration des maillages emprunte la même stratégie déclaratoire que celle du MNT : partition, déclaration des paramètres locaux de maillage et construction du maillage.

La méthode a été appliquée avec succès dans de nombreux contextes comme en fait foi l'application réalisée sur la rivière Chicoutimi suite aux crues catastrophiques du Saguenay en 1996. La grande hétérogénéité des données disponibles dans ce cas a nécessité la mise en œuvre d'une telle méthode. Ainsi, des données d'élévation obtenues par photogrammétrie, à la station

totale ou par échosondeur sur des transects ont pu être coordonnées et prises en considération simultanément pour des fins de simulation hydrodynamique ou de bilan sédimentaire dans les zones fortement érodées par la crue.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAKER T.J., 1987. Three Dimensional Mesh Generation by the Triangulation of Arbitrary Point Sets, AIAA Paper 87-1124-CP, 255-271.
- BOVEE K., 1978. The Incremental Methodology of Assessing Habitat Potential for Coolwater Species, with Management Implications. *Am. Fish. Soc.*, Special Publication, 11, 340-346.
- CHAMBERLAND M., ROBERGE R., BOUCHER J.-P., PICARD F., 1993. Cartographie des zones inondables, rivière Chicoutimi à Laterrière. Ministère de l'Environnement du Québec, Direction du domaine hydrique. DH-93-01.
- DHATT G., TOUZOT G., 1981. Une présentation de la méthode des éléments finis. Presses de l'Université Laval. Québec. 544 p.
- EL-JABI N., ROUSSELLE J., 1987. A Flood Damage Model for Flood Plain Studies, *Wat. Res. Bul.*, 23(2), 179-188.
- FORRESTER W.D., 1983. Manuel canadien des marées. Ministère des Pêches et Océans, Canada. Publication Fs75-325/1983 F, 148 p.
- FREAD D.L., 1984. DAMBRK: The NWS Dam-Break Flood Forecasting Model. National Weather Service, Office of Hydrology, Silver Spring, Md.
- GAUTHIER Y., SECRETAN Y., LECLERC M., 1997. Construction d'un modèle numérique d'élévation pour l'analyse de crues majeures à l'aide du logiciel Modeleur. Actes du 9^e Symposium international de géomatique, Ottawa, Mai.
- GHANEM A., STEFFLER P., HICKS F., KATOPODIS C., 1994. Two-dimensional finite element flow modelling of physical fish habitat. In: *Proceedings of the 1st international symposium on habitat hydraulics*, Trondheim, Norway, pp. 84-98.
- GUAY J.C., BOISCLAIR D., RIOUX D., LECLERC M., LAPOINTE M., LEGENDRE P., 2000. Development and Application of Numerical Habitat Models. *Accepté Can. J. of Fish. and Aqu. Sc.* À paraître.
- GUNARATNAM D.J., PERKINS F.E., 1970. Numerical Solutions for Unsteady Flow in Open Channels. Report No. 127, Hydrodynamics Laboratory, Department of Civil Engineering, M.I.T., Cambridge, MA, USA.
- HAMILTON K., BERGERSEN E.P., 1984. Methods to Estimate Aquatic Habitat Variables. Colorado Co-operative Research Unit. Col. St. Univ., Ft. Collins. CO. Bureau of Reclamation. p.v.
- HENICHE M., SECRETAN Y., LECLERC M., 1999. HYDROSIM 1.0a06 – Guide d'utilisation. Rapport INRS-Eau R482-G2. 90 p., p.v., Janv.
- HOANG V.D., 1990. Rivière Chicoutimi – Évaluation des conséquences d'une rupture du barrage de Portage-des-Roches. Ministère de l'Environnement du Québec, Direction de l'Hydraulique.
- HYDRO-QUÉBEC, 1992. Rivière Chicoutimi – Étude des conséquences d'une rupture du barrage de Portage-des-Roches sur la rivière Chicoutimi. Service hydraulique, Aménagement de centrales. Rapport 07442-RA-92/40. 29 p. et annexe cartographique. Sept.
- HYDRO-QUÉBEC, 1996. Aménagements Chute Garneau et Pont-Arnaud. Rapport des événements du 20 au 23 juillet 1996.
- LAPOINTE M.F., SECRETAN Y., DRISCOLL S., BERGERON N., LECLERC M., 1998. Response of the Ha! Ha! River to the Flood of July 1996 in the Saguenay Region of Québec: Large-Scale Avulsion in a Glaciated Valley. *Wat. Res. Res.*, 34(9), 2383-2392.

- LECLERC M., BOUDREAU A., BECHARA J.A., CORFA G., 1995. Two-Dimensional Hydrodynamic Modeling: A neglected Tool in the Instream Flow Incremental Methodology. *Trans. of the Amer. Fish. Soc.*, 124, 645-662.
- LECLERC M., SECRETAN Y., 1997. Simulation hydrodynamique et bilan sédimentaire des rivières Chicoutimi et des Ha ! Ha ! lors des crues exceptionnelles de juillet 1996. Rapport INRS-Eau, N° R487. Pour le compte de la Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages, 207 p.
- MILHOUS R.T., 1996. Modeling Instream Flow Needs: The link Between Sediment and Aquatic Habitat. In: LECLERC *et al.*, eds. Proceedings of the 3rd Symposium on Habitat Hydraulics – Ecohydraulics 2000. Québec, pp. A319-A331. Juin.
- MORIN J., LECLERC M., SECRETAN Y., BOUDREAU P., 2000. Integrated Two-Dimensional Macrophytes-Hydrodynamic Modeling - Application to Lake Saint-François (St. Lawrence River, Québec, Canada. *J. Hyd. Res. (IAHR)*. 3(38), 163-172.
- NOLETTE C., GAGNON P.A., AGNARD J.P., 1992. The DVP - Design, Operation and Performance. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 58(1), 65-69.
- OUARDA T.B.M.J., EL-JABI N., ASHKAR F., 1995. Flood Damage Estimation in the Residential Sector, in "Water Resources and Environmental Hazards" (HERMANN R., SIDLE R.C., BACKW., JOHNSON A.I., eds.), *AWRA Technical Publication Series*, TPS-95-2, 73-82.
- RIOUX D., 2000. Contribution à la validation physique de la modélisation des micro-habitats en 2D pour le saumon atlantique de la rivière Sainte-Marguerite. Mémoire de maîtrise en sciences de l'eau. INRS-Eau. 150 p.
- SECRETAN Y., ROY Y., GRANGER Y., LECLERC M., 2000. Modeleur 1.0a07 – Guide d'utilisation. Rapport INRS-Eau R482-G3F. 235 p., p.v., Juin.
- SECRETAN Y., LECLERC M., 1998. Modeleur: a 2D Hydrodynamic GIS and Simulation Software. *Proceedings of Hydroinformatics Conference*, on the behalf of the IAHR. Copenhagen, Août.
- SHANAHAN P., Harleman D.R.F., 1982. Linked Hydrodynamic and Biochemical Models of Water Quality in Shallow Lakes. Ralph Parsons Laboratory. Aquatic Science and Environmental Engineering. Massachusetts Institute of Technology. Report n° 268. 279 p.
- USACE, 1990. HEC-2 Water Surface Profiles User's Manual. Hydraulic Engineering Centre Davis, California, USA, 308 p.
- WU J., 1969. Wind stress and surface roughness at air-sea interface. *J. Geophysical. Res.*, 74(2), 444.
- ZIENKIEWICZ O.C., MORGAN K., 1983. Finite Elements and Approximation. John Wiley and Sons. Toronto. 328 p.